第40卷 第1期	中 国 岩 溶	Vol. 40 No. 1
2021年2月	CARSOLOGICA SINICA	Feb. 2021

刘馨泽,孙东,曹楠,等,黄龙核心景区多层级水循环系统结构研究[J].中国岩溶,2021,40(1):19-33. DOI:10.11932/karst20210103

黄龙核心景区多层级水循环系统结构研究

刘馨泽^{1,2,3},孙 东^{1,2,3},曹 楠¹,袁楠楠⁵,黄何平⁴,田长宝⁴,张清明⁴,唐 淑⁴, 李大猛4,周大吉2,董发勤。

(1. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心,四川成都 610081; 2. 四川省华 地环境科技有限责任公司,四川成都 610081;3.四川省环境保护地下水污染防治工程技术 中心,四川 成都 610081;4. 黄龙国家级风景名胜区管理局,四川 松潘 623300;5. 四川冶 勘设计集团有限公司,四川成都 610081; 6. 西南科技大学,四川 绵阳 621010)

摘 要:为查明四川黄龙核心景区钙华层内水体的循环交替过程及水循环系统结构,采用野外实地 调查、水循环断面监测等方法,分析任一监测断面的地下水径流量和地表水流量(二次转化泉形成) 组成、循环段内的补给和排泄特征,理清各水循环系统的发育规模、层级。分析结果表明,丰水期水 循环系统层级最为复杂,分为区域一局部一场地三个循环层级,以局部循环为主。以7月为典型月, 景区内水循环主要受控于4个串联发育的局部地下水循环系统,区域地下水循环系统在接仙桥以北 地段发育,各循环段内的充水彩池群为补给区,出口为流量较大的钙华二次转化泉,地下水在钙华层 内径流,钙华层底部和两侧为隔水边界;争艳池以南场地水循环较多;景区水循环系统结构年动态变 化较大,仅在丰水期达到动态平衡状态。转花池泉群、黄龙沟东坡泉群、黄龙沟地表水及地下水构成 了驱动核心景区水循环系统的全部水量,接仙桥、涪江右岸为排泄口。黄龙核心景区水循环在丰水 期形成动态平衡,其余时段处于不稳定流动状态。

关键词:水循环系统;丰水期;黄龙景区;钙华层;水量监测 **中图分类号**:P641.6 文献标识码:A

文章编号:1001−4810(2021)01−0019−15 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

0 引 言

黄龙是世界著名的旅游胜地,位于四川省阿坝 藏族羌族自治州松潘县东部。黄龙景区以钙华沉积 地貌及附属的水体景观为主要特色。近年以来景区 内部分地段出现了钙华黑化、沙化、水体漏失增强等 问题,对景区景观品质和可持续开发保护产生了一 定的不利影响。为了逐步解决这些问题,对景观水 渗漏、径流及其完整的循环过程研究就显得尤为 重要。

20世纪70年代以来,许多的科研人员针对黄龙

景区水化学特征、钙华"源泉"的成因、核心景区内碳 酸钙沉积过程、人类活动及微生物等对钙华的沉积 控制作用等进行了比较系统的研究。

自20世纪90年代起,以中国地质科学院岩溶地 质研究所为代表的科研院所,在黄龙地区开展了大 量的科研工作,刘再华等印对黄龙景区钙华的形成及 沉积规律、同位素组成特征、钙华碳循环等进行了较 为系统地研究,成都地质学院卢国平等人分析了水 流动力条件、藻类在钙华的形成和破坏中的作用。 这一阶段重要的研究成果是岩溶地质研究所刘再华 等人通过碳同位素测年等手段,论证了黄龙景区钙

基金项目:黄龙国家级地质公园水循环特征和景观保育技术研究(5132202018000229)

第一作者简介:刘馨泽(1987-),男,高级工程师,硕士,主要从事水文地质、旅游地质等研究工作。E-mail:cliu_7411@163.com。

通信作者:孙东(1982-),男,高级工程师,博士,主要从事地下水资源调查、污染治理等研究工作。E-mail:sundong2003@126.com。 收稿日期:2020-09-20

华源水中的CO。为深部岩浆成因。

四川地矿局水文地质工程地质队于1987年-1993年于九寨沟—黄龙景区一带开展了系统化的环 境地质监测工作,获取了较为系统的景区水体水化 学数据,但未做更为深入的分析。

2000年以后,刘再华等^[2-7]通过同位素、水化学分 析等手段对黄龙景区钙华源泉的形成、钙华形成机 制和沉积速率及控制条件分析、碳平衡计算进行了 有效的论证和讨论,得出了比较一致的结论,即:黄 龙景区一带的钙华形成的主要控制条件为望乡台断 层一带出露的转花池岩溶泉群,其为具有钙离子浓 度高、CO₂分压高特征的较深循环岩溶泉,与黄龙后 沟的地表水混合,控制核心景区钙华水体景观的形 成和演化。

2010年至今,西南科技大学董发勤等^[9]在黄龙景 区开展了微生物、藻类对钙华形成的控制作用研 究^[10];中科院地球化学研究所张金流^[11]研究了人类 旅游活动(PO₄³⁻、NO₃、溶解有机碳等)对钙华沉积的 影响。

唐淑等[11]根据多年水量监测结果提出地表水 在径流转化过程中,大量水体在地下流失及钙华地 表水下渗是造成区内地表水量减少的主要原因[4]。 张金流等[12]认为,近年来地表径流垂直下渗量逐年 增加才是导致地表水水量减少的主要原因。李前 银¹⁸初步分析了核心景区内存在4个水体转化段, 并认为每一循环段出露的二次转化泉构成下一循 环段的"源泉"。郭建强等[13]对黄龙沟流域进行水 文地质单元划分:以望乡台为界,划分为南北两个 含水单元,其南为补给径流区,其北为径流排泄区, 北部含水单位又可根据泉群集中区和彩池集中区 进一步划分为迎宾池、争艳池和五彩池三个次级含 水单元。代群威等^[14]采用电子扫描显微镜(SEM) 和探地雷达、电磁法等地质探测技术,针对钙华地 质体的多孔性质及对水循环的调节意义进行了研 究。王海静[15]认为五彩池至黄龙沟沟口地表水存 在4个转化段。

前人针对黄龙景区的水循环系统进行了初步研究,但受限于调查资料、水量监测数据的精度,对水循环系统的结构划分尚存在一定分歧。因此,本文就黄龙核心景区内转花池至涪江全部的循环过程进行分析研究,为后续的景观保育技术研究提供一定的数据支撑。

1 研究区概况

黄龙核心景区转花池至涪江段,为钙华沉积段, 长度3.6km,宽度100~200m。其底部为更新统冰水 沉积泥砾层、两侧为三叠系、志留系砂板岩,均为相 对隔水边界。

黄龙沟上游是大面积分布的碳酸盐岩山区,冰 雪融水和降水自雪宝顶、玉翠峰一带渗入地下,由南 向北径流,受望乡台断层(下盘为三叠变质砂岩、板 岩)阻水影响,地下水上升在转花池内的断层的薄弱 处排泄形成泉群,内有6个泉口,为全区景观水主要 的"钙源和碳源",黄龙后沟地表水水量为转花池泉 群的4~8倍,为景观水主要的"水源"。区内地表水由 南向北径流,经过五彩池、映月彩池、争艳池、隐芳 池、金沙铺地、盆景池、潋滟湖、迎宾池等后,在涪江 右岸形成大量地下水溢出带,地表水和地下水一同 排进涪江。

景区内年降水量929.5 mm,主要降水量集中于 5-9月。

2 研究手段和方法

本研究采用水文地质调查、水循环断面流量监测、水质监测、降雨量监测、RTK坐标测量等手段。 区内原有的水量监测点是利用厚度达5 cm的木板制 作而成,且底部封堵不严,存在严重漏水情况,测量 而得的数据极不标准,不满足测流堰的设计要求。 故对工作区内全部的测流堰进行了更换,采用标准 2 mm钢板,按照规范要求制作成三角堰箱、矩形堰 箱,放置于侧流处,在安装时对表层疏松钙华及杂填 土进行清理,确保堰箱放置水平,底部和两侧封堵完 全,不发生漏水现象;在河流段进行拓宽平整处理, 保证堰箱内水体平稳,以保证测量精度。涪江断面 出口施工条件所限,故采用TD1206A型便携式流速 测算仪测定景区出口集中水体排泄区上下游涪江流 量,通过差值计算钙华层进入涪江的水量。

降雨监测站位于隐芳池下游,采用基康 BGK9010一体化雨量站监测景区全年降水量。

本研究设置了7个水循环监测断面,共计16个 监测点,控制了研究区内与水循环相关的全部大型 泉点和泉群(图1)。

采用人工测量,监测频次为每月3次,监测周期 为2019年4月-2020年11月。对主要的水点进行坐 标和高程测量,为水循环系统分析提供基础数据。7



图1 水循环监测断面分布图

Fig. 1 Distribution map of water circulation monitoring section

个监测断面为5个主要水循环监测断面(14个监测 点)和2个次级监测断面(2个监测点),监测点详情 见表2。

监测断面I:监测对象为Q1泉群-转花池泉群(6 个泉口)、黄龙沟地表水,黄龙沟东坡泉群Q2。设置7 个监测点,监测局部循环起始断面进入景区的水 量。监测站为1-7号,其中1-5号站监测转花池泉群 各泉口,6号监测黄龙后后沟地表水,7号监测黄龙沟 东坡泉群。 监测断面I-1:转花池出口。监测转花池进入五 彩池的水量,监测站为8号。

监测断面 I-2:监测马蹄海地下水溢出带(Q3 泉群)水量变化,分析场地循环,监测站为9号。

监测断面II:位于接仙桥,监测对象为玉液泉和 接仙桥大泉下游河流水量。监测第一循环段出口水 量变化。因施工条件所限,未在接仙桥上游大泉处 设置监测点,监测站为10号、11号。

Table 1 List of flow monitoring sections								
监测站	所在监测断面	断面编号	监测点位置	堰箱类型	水体类型	与地下水天然露头关系		
1			原3号和5号泉点汇流口	矩形堰	地下水	泉口下游		
2			原1号泉点下游	矩形堰	地下水	泉口下游		
3			原2号泉点旁	三角堰	地下水	泉口		
4	转花池监测断面	Ι	原4号泉点旁	三角堰	地下水	泉口		
5			原6号泉点旁	三角堰	地下水	泉口		
6			原7号地表水点	矩形堰	地表水	溪流		
7			黄龙沟东坡泉群下游	矩形堰	地下水	泉群下游		
8	五彩池进口监测断面	I-1	五彩池进口	矩形堰	混合水	溪流		
9	马蹄海断面	I - 2	马蹄海横桥下方季节泉群	矩形堰	地下水	泉群下游		
10	接仙妖柩声	TT	玉液泉	矩形堰	混合水	泉口		
11	按曲炉时间	11	接仙桥大泉下游	矩形堰	地下水	泉口下游		
12	会羊白虾西	TTT	隐芳泉下游	矩形堰	混合水	泉口下游		
13	百年水町田	111	含羞泉	矩形堰	地下水	泉口		
14	龙泉眼断面	IV	龙泉眼	矩形堰	混合水	泉口		
15	口将非洲虎里	V	景区人口桥下	流速仪	地表水	河流		
16	必哄排他咧甩	V	四号停车场旁	流速仪	混合水	河流		

表1 流量监测断面一览表

监测断面III:监测玉液泉和隐芳泉。监测第二 循环段出口水量变化,监测站为12号、13号,其中12 号站监测为Q6泉和地表水的混合水。

监测断面IV:监测龙泉眼。监测第三循环段出口水量变化,监测站为14号。

监测断面V:监测钙华层向涪江排泄地下水的总量,监测站为15号、16号。因无法在出口处修建测流站,分别测量排泄出口上下游(景区大门桥下、四号停车场旁)的地表水流量,两者相减即为钙华层地下水向涪江排泄的水量总和。

黄龙景区内水体分为地表水和地下水两部分, 因钙华层底部边界和两侧边界为隔水边界,地下水 被圈闭在钙华层内进行径流,不向邻侧岩土体进行 泄露;地表水在径流过程中存在一定的蒸发,据刘再 华的分析,黄龙地表水在流过钙华过程中,蒸发使地 表水损失为5%。为方便研究,本文做出如下合理近 似假设:①水循环过程不考虑蒸发影响,水体仅在地表 水和地下水之间进行转化;②丰水期地下水系统流 场稳定后,钙华层任意垂直断面上,相同时刻下,通 过此断面的地表水量和地下水量之和为某一定值。

通过钙华层的总水量一定的情况下,不同位置 的地表水量和地下水量的组成也会发生变化,在循 环段出口的位置,因排泄作用,地下水分量减少,地 表水分量增加;反之在补给、径流段,地下水分量增 加,地表水分量减少。在地表显示便是彩池群渗漏, 干涸地段增加。也就是说,区内水循环的过程实际 是受地下水循环控制,通过分析不同断面的水量组 成、断面间的补给和排泄特征,便可分析出水循环系 统的层级和规模。

3 结果和分析

3.1 泉点、泉群出露及径流分析

核心景区内丰水期黄龙景区内泉口达23处,其 中钙华二次转化泉有18处(少量为普通泉水,主要见 于接仙桥西侧沟道边缘,流量普遍不足1L·s⁻¹,与钙 华水循环无关),大部分为季节性泉点,多见地下水 溢出带,泉口密集。整合后,区内大型的泉点或泉群 有处9处,Q3-Q9形成了各循环段的地下水排泄出 口,Q1、Q2为核心景区水循环初始补给水源的一部 分。枯水期时候仅有5处,且大部分接近断流状态, 仅转花池泉群(Q1)流量稍大。

Q1号泉群:转花池泉群,泉口6处。常年有水,

为钙华源泉,转花池一接仙桥循环段的补给水源之 一,本泉群出露绝大部分汇流(除6号泉汇入黄龙沟) 后流经转花池林地,发生渗漏,剩余水量涵养五彩 池,至黄龙后洞南侧完全入渗,形成地下径流。总流 量为4035~13112 m³·d⁻¹(4月-11月),其中进入五彩 池的初始水量(1-5号泉口汇总流量)为3919~ 12375 m³·d⁻¹。泉水来源主要为玉翠峰、鹰咀岩一带 冰雪融水,经碳酸盐岩山区入渗补给,循环深度较 大,地下水径流至此,沿望乡台断层上升形成断层上 升泉群,同时,有少量上游冰碛河谷地下水侧向补 给。平均水温6.5℃,pH为6.2~6.6,水中二氧化碳 分压(PCO₂)在200 hPa左右。方解石矿物呈未饱和 态(SIc<0)。

Q2号泉群:黄龙沟东坡泉群,为地下水溢出带, 枯期断流,转花池—接仙桥循环段的次要补给水源。 流量为112~1611 m³·d⁻¹(4月-11月),5月份中下旬 开始出露地表。出露条件较差,流量偏小,水量汇入 黄龙沟,与后沟地表水一起汇入映月彩池,至马蹄海 中部,绝大部分渗入地下,残留水流涵养滩地。泉口 处为冰碛砾石层(Qpst),地势较转花池泉群较高,枯 期水头降低泉水断流,丰水期形成地下水溢出带,但 有较多的地下水通过冰碛层径流,未出露。

水质与转花池泉群类似,水温 5~5.6 ℃,pH 为 7.1~7.3,HCO₃浓度在 610~740 mg·L⁻¹(4月-9月,表 2),略低于转花池泉群(Q1,740~910 mg·L⁻¹),这是有 少量山前普通地下水混入所致。本泉群与转花池泉 群均受望乡台断层控制,均呈高重碳酸根、高钙、高 二氧化碳分压等特征。此地 PCO₂为 29.9~43.2 hPa, 为转花池泉群的 15%~20%。方解石矿物呈过饱和态 (SIc>0)。

Q3号泉群:马蹄海横桥下季节性地下水溢出带 (转化泉),主要出水点有8处,枯期全部断流。每年5 月以后开始有水,流量呈指数增长,最大可达 45 084m³·d⁻¹(6月)。其补给水源主要由黄龙沟地表 水在映月彩池垂直入渗形成,径流途径短,动态变化 大。本泉群上游至黄龙寺一带有连续分布的岩溶管 道作为径流通道,这也是其水量变化较大的重要原 因之一。泉群出露后形成地表径流流经林区,至黄 龙中寺一带,径流极弱,绝大部分入渗形成地下水。

泉群水温一般为4.8~6.0℃,pH7.4~7.5,HCO₃ 浓度普遍降到了400 mg·L⁻¹左右,Ca²⁺浓度降到了 100 mg·L⁻¹左右。水中二氧化碳分压(PCO₂)降至 10 hPa左右。方解石矿物呈过饱和态(SIc>0)。

	Table 2 Hydrochemical characteristics of main spring groups in Huanglong core scenic spot									
监测泉群	野外监测/	水温 t/℃	nН	电导率/	$[Ca^{2+}]/$	$[Mg^{2+}]/$	$[HCO_3]/$	PCO./hPa	SIc ⁽¹⁾	
编号	月/年		pm	$\mu s \cdot cm^{-1}$	$mg \cdot L^{-1}$	$mg \cdot L^{-1}$	$mg \cdot L^{-1}$	1 CO ₂ / III a	510	
	4/2019	6.5	6.2	1 163	231.5	25.9	746.5	196.4	-0.17	
01	5/2019	6.4	6.6		190.0	21.3	877.6	168.1	-0.04	
Q1	7/2019	7.2	6.4	1 143	196.5	19.7	842.1	281.7	-0.26	
	9/2019	6.7	6.6	1 100	183.0	19.6	745.4	158.0	-0.15	
	5/2019	5.0	7.1		119.0	14.6	610.7	34.3	0.16	
Q2	7/2019	5.6	7.1	987	183.0	18.9	740.3	43.2	0.39	
监测泉群 编号 Q1 Q2 Q3 Q4 ⁽²⁾ Q5 Q6 ⁽³⁾ Q7 Q8	9/2019	5.2	7.2	946	162.0	17.7	637.2	29.9	0.38	
	5/2019	4.8	7.4	582	81.6	11.4	388.7	11.7	0.12	
Q3	7/2019	6.0	7.4	645	113.0	11.5	431.9	13.1	0.31	
Q3 Q4 ⁽²⁾	9/2019	5.4	7.5	570	85.2	11.1	365.0	8.8	0.22	
	5/2019	4.6	7.6	582	36.8	11.6	367.1	7.2	-0.03	
$\mathbf{Q4}^{(2)}$	7/2019	5.4	7.4	599	95.0	10.8	400.1	12.2	0.20	
	9/2019	5.9	7.6	532	78.8	10.4	327.9	6.4	0.25	
	4/2019	4.7	7.0		178.0	21.7	613.8	49.6	0.15	
05	5/2019	4.9	7.2	719	98.4	12.2	456.6	21.7	0.06	
Q_5	7/2019	5.5	7.2	680	121.0	12.0	462.7	22.2	0.15	
	9/2019	6.5	7.6	591	91.9	11.2	389.7	7.5	0.39	
	5/2019	5.0	7.3	593	83.4	12.4	302.3	11.6	-0.07	
$\mathbf{Q6}^{\scriptscriptstyle{(3)}}$	7/2019	7.3	7.6	577	83.1	10.6	493.5	9.7	0.46	
	9/2019	6.1	8.2	542	67.7	10.3	334.1	1.6	0.79	
	4/2019	4.6	7.2		172.0	21.1	589.2	30.0	0.32	
0.5	5/2019	4.8	7.2	676	67.8	10.7	428.8	20.7	-0.12	
\mathbf{Q}	7/2019	6.2	7.4	586	96.9	10.5	370.2	11.4	0.19	
	9/2019	6.3	7.5	580	84.6	11.7	383.5	9.2	0.25	
	4/2019	4.2	7.4		109.0	21.4	499.7	15.7	0.28	
	5/2019	6.9	7.3	630	73.1	13.3	598.4	23.2	0.17	
\mathbf{Q} 8	7/2019	9.5	7.8	493	73.3	11.6	327.0	4.1	0.48	
	9/2019	8.3	8.0	496	60.2	11.5	303.1	2.4	0.54	
Q9 ⁽⁴⁾	4/2019	4.0	7.8	311	46.4	9.6	182.0	2.2	-0.02	

表2 黄龙核心景区主要泉群水化学特征

注:(1)水中方解石的饱和指数SIc=lgIAP/K(IAP为离子活度积,K为平衡常数);SIc>0为过饱和,若有钙华沉积必定满足此条件;SIc<0为未饱和状态,水对方解石有侵蚀性;SIc=0为平衡态;(2)数据来自11号监测站,位于Q4泉群下游180m的河道内;(3)Q6泉群丰水期水体包含一部分上游地表水;(4)数据来自16号监测站,位于Q9泉群下游660m。

Q4号泉:接仙桥上游的大泉出口(转化泉),流量 与玉液泉相当。季节性泉点,枯期断流。每年5月份 以后开始有水,流量最大为62106m³·d⁻¹(6月)。转 花池-接仙桥循环段重要的次级出口,泉口东侧见冰 水堆积层砾石,说明泉口已下切至钙华层底部。方 解石矿物呈过饱和态(SIc>0)。本处泉口与玉液泉为 同一循环段的两个出口,因Q4泉群位置较高,枯期地 下水潜水位下降,枯期断流。映月彩池、五彩池及上 游未在转花池一带出露的地下水,流经此处,有至少 50%的水量在此排泄,另外一部分由玉液泉排出。附 近无山前补给形成的泉水。水温一般为4.6~5.9℃, pH7.4~7.5,HCO₃浓度普遍降到400 mg·L⁻¹以下, Ca²⁺浓度降到100 mg·L⁻¹以下,因11号监测站距离泉 口180 m,水质较泉口有一定差异(主要为PCO₂、SIc 指标)

Q5号泉群:玉液泉,全年有水,转花池-接仙桥循 环段主要出口,流量为1795~64526m³·d⁻¹(4月-11 月)。丰水期有上游的西侧山前侧向形成的普通地 下水溢出带,其水量汇集后沿沟道径流于此,但总流 量较小,一般不超过1L·s⁻¹。另外,玉液泉上游的河 道为地下水渗出河段,流量逐渐增加,有较大的转化 泉口2处,水量均汇集至玉液泉。本泉群成因与Q4 泉相同。水温4.7~6.5℃,pH7.0~7.6,主要离子浓 度及组成与Q4泉类似,枯水期时,HCO₃一般可 达600 mg·L⁻¹以上。水中PCO₂变动较大,因其上游 沟道地表水(转化泉及普通泉水形成)在径流过程中 损失了大量CO₂,至此与玉液泉混合,随着丰水期到 来,混合水的主要离子浓度降到和旁侧11号监测站 (Q4泉下游)数据近似相同。方解石矿物呈过饱和态 (SIc>0)。

Q6号泉点:隐芳泉,为二次转化泉,季节性泉点, 枯期断流。一般滞后于Q3号、Q4号泉群10天左右 出水,丰水期有上游滩地的地表水汇集于此。接仙 桥一含羞泉循环段的重要次级出口。流量最大为 19 406 m³·d⁻¹(6月)。其补给水源主要为接仙桥一带 的彩池群及上游滩流,垂直入渗后于此形成泉水。 因丰水期有上游残留滩流混入泉水,此处水质变化 较大,水温5.0~7.3℃,pH7.3~8.2,水中PCO₂变动幅 度达5倍以上,丰水期时,方解石矿物呈明显过饱和 状态(SIc>0),沉积增强。

Q7号泉点:含羞泉,二次转化泉,全年有水,争艳 池边石坝底部出露。争艳池入渗形成补给水源。径 流至金沙铺地上游,一部分形成滩流,大部分成为娑 萝映彩池、明镜倒影池的涵养水源,并持续垂向入 渗。接仙桥一含羞泉循环段的主要出口。流量 为4522~50401 m³·d⁻¹(4月-11月)。水温4.6~ 6.3℃,pH7.2~7.5,因地表水混入较少,泉口主要阴 阳离子浓度高于Q6泉,丰水期到来后,HCO₃浓度呈 连续下降趋势。

Q8号泉点:龙泉眼,二次转化泉,全年有水,枯期水量微弱,近乎断流,丰水期有上游地表水汇集在此,总流量为1581~62403 m³·d⁻¹。补给水源为上游 娑萝映彩池、明镜倒影池、盆景池入渗地表水,金沙 铺地地表水入渗较少,径流路径长,是含羞泉—龙泉 眼循环段的唯一出口。水温4.2~9.5 °C, pH7.3~8.0,枯水期HCO₃浓度500~600 mg·L⁻¹,丰水期降低 至300 mg·L⁻¹左右。4月-9月,方解石饱和指数SIc 持续增长。

Q9号泉群:钙华层地下水的总出口,全年有水。 以地下水溢出带形式将核心景区内参与循环的水量 全部排入涪江,与涪江地表水混合。据16号监测站 水质数据,Q9地下水排泄带下游660m,HCO₃浓度降至200mg·L⁻¹以下。

3.2 充水彩池群为局部水循环系统的补给区

充水彩池是指被景观水充盈的彩池,依靠持续的外部水量补给(主要为地表水汇入)形成较为稳定的水域。在这个过程中,进入彩池的水量除了维持彩池的充水状态外,剩余部分,以垂向稳定入渗的形式进入地下水,这便是充水彩池对地下水的补给作用。一般彩池群连片分布,如五彩池、映月彩池、争艳池、迎宾池等,形成了连片的地下水的补给区,大量的景观水转入地下。

黄龙核心景区内的彩池群呈串珠状分布,每个 大型彩池群的下游均有大型泉水,主体水量来源为 上游彩池群地表水体下渗而成;从核心最南侧至涪 江段形成了几个地下水补给一排泄段:五彩池一映 月彩池至接仙桥(2个大泉);争艳彩池一隐芳池(2个 大泉);娑萝映彩池一盆景池至龙泉眼(1个大泉);潋 滟湖一迎宾池至涪江南岸(线状地下水溢出带),而 这4段便是核心景区4个局部水循环的主体部分,故 每个局部循环段内的充水彩池群是地下水循环的补 给区,驱动着局部的水循环。

充水彩池的渗漏模式为稳定面状入渗,地表水 和地下水之间存在弱透水的粉细砂层或弱溶蚀钙 华,地表水和地下水水位存在一定差值,池体内水位 较稳定,向地下水泄露的水量在某一时段为稳定值。

彩池一带的钙华相对其他部位较为完整,多见 层纹状钙华。层纹状钙华结构完整,风化、溶蚀一 般,是典型的低渗漏介质,有一定的阻滞地表水向下 渗漏的作用,这在争艳池和五彩池最为明显;部分大 型彩池底部存在粉细砂等渗透系数较低的层,也可 阻滞地表水的入渗。钙华彩池下部局部有黏土夹 层,或弱一中等溶蚀风化的钙华层,渗透系数较低。 综上所述,钙华彩池底部存在的低渗透层可维持钙 华彩池的地表水在一个稳定水平面上,与地下水形 成稳定的水力交换关系。

钙华层内储集有连续统一的地下水,与地表充 水彩池群形成紧密的水力联系。如截断进入彩池的 水量,可以观察到彩池的水面会持续下降,这是渗漏 过程的直观表征。据2018-2019年针对典型彩池群进 行的渗漏试验(截断进池水量或测量进池水量并测 量水池面积,评估彩池单元的渗漏强度),长期有水 涵养的彩池其单位渗漏强度一般小于1 m³·(m²·d)⁻¹, 这是表层钙华固结较好的原因。失水黑化的钙华彩



图2 典型充水彩池渗漏模式图

Fig. 2 Typical seepage pattern of Chongshuicai pools

池因为表层钙华结构遭受温差、根劈等风化营力的 破坏,结构完整性变差,渗漏强度增加,一般为充水 彩池的5倍以上,最高可达10倍以上。

若进池水量消失,充水彩池会在很短的时间内 干涸,一般不超过1个小时,说明彩池群的景观水体 在发生持续的垂向渗漏,植被及风化作用会加剧这 一过程,尤其是灌木、乔木较多的彩池群,因植物根 劈作用和温差风化作用明显,表层钙华结构多被破 坏,垂直渗漏更为强烈。

彩池群被植被或风化作用改造后,低渗层被破 坏,渗透系数增加,则原有的水量不足维持原有的水 池面积,便会发生水池收缩,影响较大则会产生大面 积的彩池群后退现象,这一现象在映月彩池、五彩池 均有体现。

转花池泉群泉水出露后向五彩池径流的过程中 发生严重的泄露。转花池泉群共有6个泉口(1-6 号),其中,6号泉口靠近黄龙沟主沟,泉水汇入后沟 地表水,其余5个泉水流量通过本次设置的1、2、3、4 号测流堰测量,为转花池泉群进入五彩池前的初始 流量,汇流后形成地表水流经林地,因地表钙华疏松 多孔,植被对钙华结构改造明显,风化剧烈,大部分 呈砾砂状态(以转花池西半部最为明显),导致河道 形成强渗漏段,大量地表水在径流过程中渗入地下, 导致剩余的地表水流量明显减小,流出转花池进入 五彩池之前,通过8号测流堰测量剩余流量,计算期 间发生渗漏的水量。据I-1监测断面(8号测流堰)的 数据来看(图3),7月-11月期间进入五彩池的水量仅 占转花池总水量(1-4号测流堰流量总和)的40%~ 50%,剩余的水量充满五彩池后,径流长度不过 120 m,至黄龙后洞南侧地表水便消失不见,全部转入 地下。



Fig. 3 Variation of inlet flow of Wucai pool (2019)

这说明转花池总水量的50%~60%维持五彩池水 域面积,流入五彩池的水量垂直向下入渗的水量相 等,是一种稳定入渗状态,这些水量进入地下水后, 驱动第一局部循环段。

五彩池东侧的映月彩池水源主要为黄龙沟地表水,径流长度不过300m,大部分地表水转入地下,地

表残留少量辫状水流,这些水量与五彩池入渗的水 量一同构成第一局部循环段的驱动水流。

争艳池、隐芳池、盆景池、潋滟湖、隐芳池等彩池 也存在这种垂向入渗的情况,但有连续的、充足的水 量进入彩池内,在维持稳定入渗状态的同时,各循环 段出口的泉水维持较大的水量,为循环段内提供充 足的景观水,枯水期来临,入池流量减少或消失,彩 池稳定入渗状态不能保持从而干涸,垂向入渗消失, 作为循环段内补给区的作用也消失,导致循环变弱 或者消失。

由此可知,普遍发生彩池群渗漏,使得彩池群成 为地下水系统的补给区,推动不同循环段的串联 发育。

3.3 接仙桥一带为地下水弱径流带

接仙桥一带钙华宽度为核心景区内最窄,仅有 80~90 m,其余部分为120~200 m;据接仙桥一带手工 浅钻和物探资料表明,第四系沉积物主要为河流冲 积相细砂、砾砂夹少量未固结钙华砂,厚度在13 m 左右,含水层厚度在8~12 m,其渗透性也远不如蜂 窝状钙华层,这与景区内其他地段的钙华结构大有 不同;玉液泉(11号监测点)常年有水,接仙桥一带平 均水力坡度为0.09左右(表3,据补给区、排泄区距离 和高程差进行估算),丰枯季节差别不大;细砂层渗 透系数据抽水试验而得,静止水位为1.82 m,降深 0.199 m,涌水量41.76 m³·d⁻¹,计算得渗透系数为 12.61 m·d⁻¹。

Table 3 Average hydraulic gradient of groundwater in Jiexian bridge area

	e	. 0	8	8
计算点	高程/m	距离/m	平均水力坡度/°	备注
Q5泉点	3 404.75			玉液泉
Q4泉点	3 422. 12	230	0.08	接仙桥上游大泉,枯期无水
8号监测站	3 534.63	1 340	0.10	转花池边缘

含水层厚度取12m,含水层宽度取90m,据达西 定律,计算通过接仙桥断面的地下水日径流量:

 $Q = K \times I \times H \times L = 12.61 \times 0.09 \times 12 \times 90 = 1226 (m^3 \cdot d^{-1})$

该监测断面监测到的日平均水量(11号监测站 泉点和10号监测站点河流径流量之和)为3~9万m³/d, 按照最小流量3万m³·d⁻¹计算,地下水径流量占全断 面流量4%左右,可以将该断面的地下水径流量忽 略,以10、11监测站点合计的水量代表通过全断面的 流量。

李前银等^[8]估算五彩池一接仙桥转化段的水量 全部由玉液泉和接仙桥大泉排出,这与本文所分析 的相一致。

3.4 各断面循环水量动态分析

本次监测水量实际为总断面水量的地表水分量 (地表水和泉水),未特别指明的断面循环水量指的 是地表水分量。

据2019年全年的降水动态数据(图4),枯水期为 11月至来年2月,平水期为3月-4月(时间较短),丰 水期主要为5月-10月。全年降雨动态变化大,各水 循环监测断面水量也随之变化。自5月上旬,降雨开 始明显增加。各循环段水量开始调整,随后进入一 个稳定阶段,形成稳定系统。

由图5可知,6个监测断面(I、I-2、II、III、IV、V)的 月动态变化具有一致性,且与降雨的变化相似。断 面流量自4月底开始增长,6-9月保持一定的流量,10





月份水量开始衰减至4月份水平。6月至8月雨量出 现持续衰减,断面流量也同步较小,9月雨量突然暴 增,断面水量的动态曲线也产生了对应的峰值。说 明景区内埋藏地下水的钙华层其渗透性良好,水量 动态相对降雨动态有着极好的动态响应。

接仙桥断面(断面 II)和涪江断面(断面 V)的动态响应具有高度一致性,且动态曲线近似重合,说明接仙桥断面的水量基本全部排入涪江,由前文可知,接仙桥一带为地下水弱径流带,地下水径流量可以忽略,其断面水量可以代表通过此处钙华层断面的全部水量,也就是说,钙华层内水体全部渗入地下后,集中排泄至涪江。

检测结果表明(图6)各监测点水量关系为:马蹄



27



Fig. 5 Dynamic changes of water volume of each monitoring section (2019)



Fig. 6 Relationship diagram of monthly average water volume of each monitoring section

海断面(断面I-2)<龙泉眼断面(断面IV)<含羞泉 断面(断面III)<转花池断面(I)<涪江断面(断面V) ≈接仙桥断面(断面II)。

接仙桥断面水量>转花池断面,说明,在起始断面I,除了转花池泉群、黄龙沟东坡泉群、黄龙沟地表水以外,还有一部分水量未出露地表,而是以地下水的方式径流至接仙桥一带从大泉排出,水量变动较大,丰水期一般在9000-27000 m³·d⁻¹之间(表3)。

水量在接仙桥断面II、涪江断面V处达到最大, 接仙桥向下游呈明显减少趋势(图5),接仙桥断面 (II)水量比较稳定,这进一步说明断面上游存在较为 丰富的地下水起到一定的调蓄作用,且在不同月份 存在不同的稳定状态,6、7、9月和5、8、10月份稳定点 不同,4月份地下水系统还处在不稳定状态。相比 较,龙泉眼断面IV所监测的第三循环段稳定状态较 差,而且有较明显的滞后效应。

4月份水量出现断面I>断面II的情况(表4),是 因为进入平水期后,水循环系统中地下水径流开始 增强,钙华层内地下水不断增加,补给排泄处于不平 衡状态,地下水水位逐步升高,断面I的水量大部分 用于补充地下水,从而导致下游泉口流量偏小。待 上游潜水面整体抬升后,马蹄海地下水溢出带有泉 群冒出,接仙桥处泉点流量才开始增长,先是玉液 泉,而后接仙桥上游大泉(Q4泉)由季节泉状态复活,

 Table 4
 Flow variation between Jiexian bridge section (II)

and Zhuanhua pool section (I)										
日仏		流量/m ³ ·d ⁻¹								
71 [1]	断面I监测流量	断面II监测流量	断面I地下水分量							
4	11 687.95	2 638. 49								
5	53 576.89	55 935. 94	2 359.04							
6	79 244.92	91 276.73	12 031.80							
7	60 617.48	88 017.36	27 399.89							
8	46 495. 51	56 184.82	9 689.31							
9	57 710.35	85 681.09	27 970.74							
10	40 002.45	57 677.66	17 675.20							
11	25 453. 51	40 313.82	14 860.31							

水循环系统达到新的稳定状态。

含羞泉断面(III)、龙泉眼断面(IV)水量均小于 接仙桥断面(II),说明有相当一部分水量进入地下 水,脱离了本循环段,进入深部的地下水循环系统。 接仙桥下游,含羞泉、龙泉眼处水量动态曲线出现一 定的滞后性,产生了"滤波"效应,曲线变得平滑,以 龙泉眼最为明显,说明自金沙铺地以下,地下水径流 量明显增加,地下水的调蓄作用降低了泉口流量的 动态变化。

以接仙桥断面为基准,计算上下游各断面的水 量组成(表5)。表5中列出了各断面水量的组成,S 代表泉水和残留地表径流量总和,D代表未出露地表 的地下径流量。

表5 黄龙景区各断面水量组成(2019年,S为地表水,D为地下水)

Table 5	Composition of	f water volume of	each section	of Huanglong	scenic area	(In 2019,	S is surface	water and D is	s groundwater)
---------	----------------	-------------------	--------------	--------------	-------------	-----------	--------------	----------------	----------------

总断面/m ³ ·d ^{−1}												
月份		I I-2		II III		IV		V				
	S	D	S	D	S	D	S	D	S	D	S	D
5	53 577	2 359	$1\ 256$	54 680	55 936	/	32 708	23 228	18 255	37 681	55 847	/
6	79 245	12 032	8 563	82 714	91 277	/	57 044	34 233	51 089	40 188	84 786	/
7	$60\ 617$	27 400	19 852	68 166	88 017	/	53 639	34 378	49 774	38 244	86 206	/
8	46 496	9 689	6 027	50 158	$56\ 185$	/	43 968	12 217	33 521	22 664	49 280	/
9	57 710	27 971	$17\ 446$	68 235	85 681	/	52 462	33 219	35 078	50 603	100 737	/
10	40 002	$17\ 675$	7 752	49 925	57 678	/	$43\ 455$	14 222	19 999	37 679	55 368	/
11	25 454	14 860	238	40 076	40 314	/	27 719	12 595	6 467	33 847		

以 2019 年 7 月为水循环系统平衡典型月份 (图 7),以接仙桥断面为界,上下游均为地下水强径 流带,以马蹄海一带最为明显,地下水径流量达 68 166 m³·d⁻¹,上游簸箕海下伏钙华岩溶管道、洞穴, 径流强烈也属正常。接仙桥以下地下水径流逐渐增 强,占比在50%以下。地下径流增强的同时地表水 渗漏也在增强。区内存在两个完全排泄出口,分别 位于接仙桥和涪江出口,绝大部分地下水以泉水、泉 群形式排出地表。



Fig. 7 Composition of water volume of each section in a typical month (July 2019)

3.5 丰水期水循环系统分析

核心景区水循环的初始驱动力为黄龙后沟地表 水和转花池泉群。区内的水循环归根结底是地下水 的循环过程。而地下水的循环又受降雨、冰雪融水 的影响,所以丰水期和枯水期的循环过程是差别的。 丰水期的循环远比枯水期的循环复杂。

丰水期景区水循环系统最为复杂、也最为完整。 据各水循环断面监测资料分析,以2019年7月为典 型月,黄龙核心景区存在三个层级的水循环,包括1 个区域循环(一级循环),4个局部循环(二级循环), 部分二级循环内又发育若干场地循环(三级循环)。 4个局部循环串联发育,上一个循环排泄的水量以彩 池群垂向入渗形式驱动下一个循环。场地循环受区 内季节性泉点的控制。

初始驱动水量 Q₁=88 017 m³·d⁻¹,最终排泄水量 Q₅=86 206 m³·d⁻¹,流量减 2%,有少量地下水未排入涪 江,误差较小的情况下,可以认为补给、排泄相同。 此水量驱动不同层级、不同规模地下水系统发育。

初始水量驱动第一循环段(转花池一接仙桥 段),水体在马蹄海横桥以南全部入渗成为地下水, 赋存于强渗透钙华层内,径流至接仙桥形成2个大泉 出口,水量完全排出。这些水量又成为钙华层下部 区域循环和下一个局部循环段的驱动水源。最后排 泄至涪江的全部水量与驱动第一循环段水循环系统 的水量是相同的。

3.5.1 区域循环(A):接仙桥— 涪江段

这段为为地下水循环,循环层位为钙华层下部。 接仙桥段为极弱循环,地下水径流量不足2000m³·d⁻¹, 接仙桥上游的区域循环因为极弱,基本可以忽略。 接仙桥下游循环增强,地下水径流量达3~4万 m³·d⁻¹,控制钙华层下部地下水径流,底部和冰积泥 砾层隔水底板,两侧为砂板岩隔水边界。本循环主 要补给区为接仙桥下游彩池群,如争艳池、隐芳池、 娑萝映彩池、明镜倒影池、盆景池、潋滟湖、迎宾池 等,于涪江右岸与地下水集中排泄至涪江。

3.5.2 局部循环(B1):转花池-接仙桥段

为地下水循环。起于五彩池、映月彩池、黄龙 沟,马蹄海以南地表水全部通过彩池群下渗,构成补 给水源,形成地下水,赋存于钙华层内,经黄龙中寺, 至接仙桥一带,形成两个大的泉点:接仙桥大泉、玉 液泉。本循环段内地表水全部转入地下,虽有马蹄 海泉群出口,但地表水径流至黄龙中寺北东侧又完 全渗入地下。径流长度1380m,补给排泄区高差 110~140m。接仙桥一带钙华厚度较薄,水量绝大部 分排出地表,另有1226m³·d⁻¹的地下水脱离本循环 段进入区域循环,影响微弱,出口排泄水量为 88017m³·d⁻¹,地下水径流微弱可忽略,视为完全循 环段。本段地下水径流极为强烈。这一循环还包含 3个场地循环段(C1、C2、C3)。

(1)场地循环(C1):映月彩池一马蹄海横桥段为 地下水循环。起于映月彩池前部,受黄龙地表水驱 动,水量入渗后形成浅循环,于马蹄海横桥下方大规 模溢出带。排泄水量19852 m³·d⁻¹,剩余地下水径 流量为68166 m³·d⁻¹。系统径流长度300 m左右,补 给排泄区高差40~60 m,规模小,不稳定,水量动态变 化大,为中等强度循环。

(2)场地循环(C2):五彩池一接仙桥大泉段为地 下水循环。起于五彩池、映月彩池,其规模与系统B1 相比略小,出口为季节泉(Q4泉),流量较大,泉水出 露地表水,沿河道径流,流出本循环,与玉液泉汇合 后,进入下一级循环。系统径流长度1150m, 补给排泄区高差80~100m,为强循环,最大排泄水量 与玉液泉相当。

(3)场地循环(C3):接仙桥大泉一玉液泉段为地 下水循环。接仙桥大桥大泉为主要补给水源,经过 泉点横切沟谷的断面上,其西侧可见大片的地下水 溢出带,有普通泉水,也有钙华转化泉,水量全部排 入一条由南向北的一条季节性河道内。接仙桥大泉 Q4泉口标高(3422.12 m),接仙桥河道测流点 10 号 监测点标高3408.57 m,玉液泉标高3404.75 m,补给排泄区高差17 m,系统径流长度200 m,弱循 环,交换水量有限。

3.5.3 局部循环(B2):接仙桥—含羞泉段

主体为地下水循环,隐芳泉残留少量地表径流。 B1循环出口的水量排出地表后,进入争艳池和隐芳 池,沿途发生强烈垂向入渗,于彩池群边石坝边缘 形成新的地下水排泄出口,为隐芳泉和含羞泉,部 分滩流未全部渗入地下,流经隐芳泉,与泉水混合 后,进入娑萝映彩池。系统径流长度500 m,补给排 泄区高差40~60 m。出口断面泉水和地表水合计 53 639 m³·d⁻¹,地下水径流量34 738 m³·d⁻¹。

含2个场地循环:C4(接仙桥一隐芳泉段)和C5 (隐芳泉一含羞泉段)。C5系统径流途径极短,其交 换水量极微弱,C4为一个强循环,接仙桥水量后,潜 水面抬升,C4系统激活,接仙桥河道地表水进入隐芳 池上游的滩地入渗形成补给,于隐芳泉形成出口。 含羞泉的水量主要来自玉液泉水量的补给。

3.5.4 局部循环(B3):含羞泉-龙泉眼段

主体为地下水循环,上游沟道残留少量地表径 流。B2循环的地表水量在金沙铺地上游汇集,此循 环分两段,西段沿金沙铺地径流,水量损失较小,水 流主要沿东侧途经明镜倒影池、盆景池,形成连续的 地表水入渗带,成为本循环段补给水源,地表水未完 全渗入地下,残留地表水与龙泉眼大泉汇合后进入 下一循环。系统径流长度1030m,补给排泄区高差 90~150m。本循环段地下水水力坡度较大,径流强 烈。钙华层西薄东厚,盆景池一带最厚,达30余m, 使得地下水位大幅下降,袭夺大量地表水,表层彩池 群发育规模有限。循环段出口泉水和地表水流量 49774 m³·d⁻¹,地下水径流量38244 m³·d⁻¹。相对B2 循环段,局部循环有所减弱,下伏的区域循环有所 增强。

3.5.5 局部循环(B4):龙泉眼— 涪江段

龙泉眼断面出口的混合水流(地表水+泉水)径 流至潋滟湖、迎宾池,形成新的补给区,至迎宾池下 游进入林区后,地表水流全部进入地下,与区域循环 的地下水径流混合后,与涪江右岸形成宽度100余米 的线状地下水排泄带。系统径流长度580m,补给排 泄区高差50~80m。至此,景区内参与循环的水量基 本全部排入涪江,因沟口原有的堆积扇物质组成以 冰水沉积碎石、漂石夹少量泥砾为主,具有一定的渗 透性,据7月份监测资料,出口总排泄水量为 86 206m³·d⁻¹,与初始水量88 017 m³·d⁻¹几乎相同。





Fig. 8 System model of water circulation of Huanglong scenic area in wet season

全区补给和排泄水量达到均衡,雪山断裂南边 界断层(F2)对区内钙华层水循环未造成影响。F2断 层上盘为三叠系上统侏倭组(Tzw)变质长石石英砂 岩与板岩不等厚互层,下盘为志留系白龙江群变质 长石石英砂岩、粉砂岩、硅质板岩,地下水补给、富集 条件不佳,其两侧沟道断层露头处也未见明显的地 下水露头,总体来说,F2断层为贫水断层,且沟道基 岩上覆厚度达20m以上的冰水沉积、冰碛泥砾层,对 黄龙核心景区水循环不构成影响。

3.6 水循环系统结构丰枯期稳定性分析

黄龙核心景区内水循环系统受降雨动态变化控制明显,降雨影响进入景区的初始水量,通过调整地下水循环达到调整整个水循环的过程。初始水量是由黄龙后沟地表水、转花池泉群、东坡泉群及转花池断面地下径流组成,其中动态水流最大的为后沟地表水(图9),与降雨动态变化一致,7月-8月有下降趋势。

在枯水期,除接仙桥一带,局部循环系统处于系



图9 黄龙后沟地表水及转花池泉群月动态变化(2019年4-11月)

Fig. 9 Monthly dynamic changes of Huanglong surface water and Zhuanhuachi spring groups (from April to November, 2019)

统休眠状态,除五彩池一带,地表水基本消失,按照 补给条件来看,其余循环段内无垂向入渗的重力驱 动水流,仅转花池一五彩池一带至涪江段形成比较 稳定的区域地下水循环,循环长度3.6km,循环深度 13~30m。此阶段,水循环主要以地下水循环为主, 因大气降雨补给极少,地下水水位持续下降,属于不 稳定系统。

进入平水期后,水循环系统开始由地下水循环 向地表水和地下水混合循环转化,在这个过程中,存 在一个系统稳定性调整的过程,也就说,在这期间, 全区的水循环系统处于动态调整不断向新的平衡转 化的过程,为不稳定状态,各个循环断面的水量就不 具备连续一致性,因初期增加的水量补给地下水,使 得地下水水位不断上升,局部循环系统开始复活,转 化泉点或转化泉群流量开始增加,各个循环段的彩 池群开始蓄水,并作为当前循环段的驱动水流,水循 环系统向近似稳定状态迁移,这个调整过程一般需 要1-2个月。

进入丰水期,初始水量大大增加,地下水水位抬 升并稳定,形成全区连续的潜水面,初始水量除去驱 动区域循环系统部分,剩余部分驱动局部循环系统 不断增强,大量地下水以转化泉点或转化泉群方式 溢出地表,彩池群完全蓄水,地表水流贯穿景区,潜 水面不再抬升,水循环系统达到稳定状态,在这个时 段,各个循环段通过的水量在数值上具备一致性。

2019年5-11月参与核心景区水循环的水量(泉水、地表水与地下径流,据接仙桥监测断面10号、11号监测站流量合计)为4万m³·d⁻¹~9.1万m³·d⁻¹(图10),平均水量为6.8万m³·d⁻¹。与同期的月降雨量动

态相比,具备完全一致性。6月降雨增加,泉水流量 随之增加,7月-8月降雨量有所下降,泉水也随之下 降,水循环系统径流通畅,对降雨动态响应极快,因 为钙华层孔隙发育,赋存的地下水相当一个规模较 大的天然地下水库,对水循环的水量动态起到调蓄 的作用,使其变幅不至于过大。



Fig. 10 10 Monthly dynamics of water volume participating in the travertine water cycle from May to November 2019

与泉口流量相比,降雨对钙华层地下水的水位 动态影响较大,水位年变化幅度4~6m,最大可达8m 以上。自10月至次年的5月初,钙华层内地下水水 位处于持续下降状态。

2019年7月-8月地下水水位处于持续下降态势,这与同期降水量低于6月份是相对应的,9月份降水量相对上升后,地下水位又快速抬升(据2019年地下水水位长观数据,迎宾池以北),地下水水位埋深由15.0m抬升到9.6m,幅度达5.4m,调整时间未超过10d。进入10月、11月份后,降雨持续减少,地下水水位也呈现持续降低。



图 11 钙华层地下水水位月动态(2019年7月-11月) Fig. 11 Monthly dynamics of groundwater level in travertine layer (from July to November, 2019)

通常情况下,钙华层的地下水处于一种非稳定 流状态,降水量的变化导致地下水系统结构顶部边 界处于不断的的调整过程中,且钙华层的渗透性极 强,在涪江沿岸排泄水量过大,如无降雨补给增加后 沟地表水水量,彩池渗漏补给的水量已经不足以维 持水循环的补给、排泄平衡,系统一直向不稳定状态 转化。

每年5月份以后,区域降雨增加,区内地下水水 位开始快速抬升,足够的水量渗入地下水,使得水循 环系统在每年的6月-9月形成相对稳定的动态平衡。

4 结 论

(1)黄龙景区水循环系统年动态变化较大,丰水 期最为复杂,呈动态平衡。以7月为典型月,核心景 区内发育3层级水循环系统,以4个局部水循环系统 串联发育,钙华层下部发育1个区域循环,局部系统 内夹若干场地循环系统为主要特征。枯期仅有区域 水循环系统,局部水循环极弱乃至消失。平水期系 统因处于结构调整状态,一般不稳定,枯水期地下水 水位持续下降,为强烈的不稳定流状态;

(2)充水彩池群为各局部循环的地表水入渗补 给区,钙华二次转化泉为循环出口。驱动水循环的 初始水量由转花池泉群、黄龙沟东坡泉群、黄龙沟地 表水及未出露的地下水组成,水量在接仙桥、涪江右 岸完全排出,接仙桥以北,地下水径流量增加,地表 泉口流量有所降低。钙华层底部和两侧为隔水边 界,不存在泄露现象,两侧山前对钙华层地下水侧向 补给极微弱; (3)在第一局部循环段转花池一接仙桥段(B1系统)内,无论充水彩池群面积如何变化,进入系统的初始水量与循环段出口水量基本保持稳定状态,并 不影响下一循环段。但接仙桥以下,地下水径流较强,彩池群水域面积渗漏滩地面积的变化都会影响 循环段出口水量。

参考文献

- [1] 刘再华,袁道先,W.Dreybrodt,U.Svesson.四川黄龙钙华的形 成[J].中国岩溶,1993,12(3):4-10.
- [2] 刘再华,袁道先,何师意,等.四川黄龙沟景区钙华的起源和 形成机理研究[J].地球化学,2003(1):1-10.
- [3] 刘再华, K Yoshimura, Y Inokura,等.四川黄龙沟天然水中 的深源CO₂与大规模的钙华沉积[J].地球与环境,2005(2): 1-10.
- [4] 刘再华,袁道先,何师意,等.地热CO₂-水一碳酸盐岩系统的地球化学特征及其CO₂来源:以四川黄龙沟、康定和云南中 甸下给为例[J].中国科学(D辑:地球科学),2000(2): 209-214.
- [5] 万新南,杨菊,程温莹,等.四川黄龙景区"源水"成因浅析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(1):91-95.
- [6] 周绪纶.黄龙钙华体的碳酸盐溶质输入输出量及演化阶段[J].四川地质学报,2013,33(2):201-207.
- [7] 胥良,姜泽凡.基于钙均衡估算黄龙钙华沉积速率的探讨[J]. 中国岩溶,2007,26(2):132-136.
- [8] 李前银,范崇荣.黄龙景区水循环系统与景观演化研究[J].水 文地质工程地质,2009,36(1):108-112.
- [9] 刘明学,董发勤,孙仕勇,等.黄龙钙华水体藻多样性及分布 规律研究[J].环境科学与技术,2013,36(1):182-186,191.
- [10] 张金流,王海静.旅游活动对四川黄龙景区水化学及钙华沉 积速率的影响[J].地球学报,2011,32(6):717-724.
- [11] 唐淑,张清明,台永东,等.黄龙景区多年水量动态变化情况

调查分析[J].环境与可持续发展,2016,41(4):209-210.

- [12] 张金流,唐淑.黄龙自然风景区地表水流量减少原因初探[J]. 世界科技研究与发展,2015,37(6):688-691.
- [13] 郭建强,彭东,杨俊义.松潘黄龙水循环及钙华景观成因研究[J].四川地质学报,2002(1):21-26.
- [14] 代群威,党政,彭启轩,等.钙华天然海绵地质体多孔特性及 其对水循环调节意义:以四川黄龙为例[J].矿物学报,2019, 39(2):219-225.
- [15] 王海静,张金流,刘再华,等.基于水化学和同位素特征的四 川黄龙沟泉群分类研究[J].地球学报,2011,32(3);367-372.

Study on the structure of multi-layer water circulation system in the core scenic spot of Huanglong

LIU Xinze^{1,2,3}, SUN Dong^{1,2,3}, CAO Nan¹, YUAN Nannan⁵, HUANG Heping⁴, TIAN Changbao⁴, ZHANG Qingming⁴, TNG Shu⁴, LI Dameng¹, ZHOU Daji², DONG Faqin⁶

 (1. Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Center, Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Sichuan Huadi Environmental Science and Technology Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Sichuan Provincial Engineering and Technology Center for Environmental Protection & Groundwater Pollution Prevention and Control, Chengdu, Sichuan 610081, China; 4. Huanglong National Scenic Spot Administration, Songpan, Sichuan 623300, China; 5. Sichuan Metallurgical Geological Survey and Design Group Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610081, China; 6. Southwest University of Science and Technology, Mianyang,

Sichuan 621010, China)

Abstract In order to find out the water circulation process and water circulation system structure in the travertine layer in the core scenic spot of Huanglong, Sichuan, in this paper, the methods of surveys and water circulation section monitoring were adopted to analyze the composition of groundwater runoff flow and surface water flow, which are formed from secondary conversion spring, in monitoring section and the characteristics of recharge and discharge in the circulation section, so as to obtain the development scale and level of each water circulation system. According to the 2019 survey results and data analysis of 16 water monitoring stations, the results showed that the structure of water circulation system is the most complex during the wet season, and it is divided into three levels of regional circulation, local circulation and site circulation, with the local circulation as the main in scale. Taking July as a typical month, the water circulation in the scenic spot is mainly controlled by four local groundwater circulation systems developed in series. The regional groundwater circulation system developed in the north area of Jiexian bridge. The Chongshuicai pools between each circulation sections were the recharge areas, and the outlet was secondary conversion calcareous spring with large flow. Groundwater flows in the travertine layer and the bottom and both sides of the layer are water-proof boundaries. There are 5 site water circulation systems in the south of Zhengyan pool. The dynamics changes of the water circulation system structure in the scenic spot are great, and it reached the dynamic equilibrium state only in wet season. The surface water and underground water of Huanglong stream constitute all the water volume that drives the development of the water circulation system in the core scenic spot, and the water in the scenic area is completely discharged in Jiexian bridge and the right bank of Fujiang. The water circulation in the core scenic area of Huanglong reaches a dynamic balance during the wet season, while which is in an unstable flow state in other periods.

Key words water circulation system, wet season, Huanglong core scenic spot, travertine layer, water flow monitoring

(编辑 张玲)